第40卷 第12期
2023年12月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 12
Dec. 2023

山西省露天煤矿复垦区典型人工林凋落物持水性能研究

张建华[1]， 张 琨[1]， 刘 勇[2]， 张 红[2]， 张凯权[1]， 周晓阳[3]， 徐龙超[3]

（1. 忻州师范学院生物系，山西 忻州 034000；2. 山西大学黄土高原研究所，山西 太原 030006；
3. 太原理工大学生态学学院，山西 太原 030024）

摘 要：为了探究煤矿排土场人工林凋落物持水性能对矿区水土保持及生态系统恢复的重要作用，本研究采用野外调查和室内浸提相结合的方法，测定了山西省安太堡露天煤矿排土场4种典型人工林（小叶杨、榆树、油松和刺槐）不同分解阶段凋落物蓄积量、持水率、持水量、吸水速率等持水特性。结果表明：小叶杨和油松凋落物蓄积量显著高于刺槐和榆树（$P<0.05$）；4种人工林不同分解阶段凋落物持水率和持水量与浸水时间均呈极显著对数关系（$P<0.01$）；凋落物吸水速率呈现刺槐>榆树>小叶杨>油松，且吸水速率与浸水时间均存在极显著幂函数关系（$P<0.01$）。凋落物最大持水量和有效拦蓄量分别为：4.59~8.94 t·hm^{-2}和3.42~7.31 t·hm^{-2}，顺序均为：小叶杨>油松>刺槐>榆树。小叶杨凋落物的持水能力最强，而刺槐凋落物吸水速率最快。因此，优先栽植小叶杨，并与刺槐适当混交，对山西省露天煤矿复垦区水源涵养有积极作用。

关键词：复垦区；人工林；凋落物；持水性能；山西省

凋落物是森林生态结构的重要组成部分之一，主要由森林中散落在土壤表面的大量死亡和腐烂分解的植物枯枝落叶组成[1]，具有结构疏松、透水性强和持水能力良好等特点，能有效截持降水、拦蓄地表径流及减少水土流失等，因此，森林凋落物在水源涵养、水土保持以及促进森林水文循环等方面具有重要的生态服务功能[2-5]。近年来，随着淡水资源短缺和水环境污染等问题的凸显，森林的水源涵养功能也越来越受到人们的广泛关注[6]。森林凋落物的持水性能是反映森林水源涵养作用的一个重要指标[7]，不同类型的森林由于树种生物学特性不同，其凋落物层累积量和水源涵养效应存在差异，使得研究结果不一致，如刘效东等[2]对鼎湖山不同类型森林凋落物持水性能研究发现，凋落物蓄积量和持水量依次为针叶林、针阔混交林、常绿阔叶林；而对浙江天台县、广西苍梧县和北京山区典型森林研究表明，针阔混交林或阔叶林凋落物蓄积量及持水量高于针叶林[5,7-8]。不同分解程度凋落物持水性能也存在一定差异，有研究表明，不同植被类型森林半分解层凋落物蓄积量、持水量和持水率高于未分解层[9-10]。因此，开展不同植被类型森林凋落物累积量及其持水能力的探究，对了解和评价森林凋落物层水源涵养功能具有重要作用[11]。

我国大部分露天煤矿均处于干旱、半干旱地区，生态环境脆弱[12]。露天煤矿开采过程中形成大面积排土场，排土场具有坡度大、坡面长、物质组成复杂、不均匀沉陷等特征，掩埋原生态地貌，导致水土流失、生物多样性降低、景观碎片化等多种问题，严重影响矿区生态安全[13-14]。因此，植被恢复和重建已成为矿山排土场生态修复的一项重要措施[15]，植物根系、地表凋落物及地上覆盖度可在一定程度上减轻露天矿山排土场土壤侵蚀、改善排土场的土壤质量、提升水源涵养功能及土地生产力[16-19]。以往对露天煤矿排土场研究主要集中于土壤侵蚀[20-21]、边

收稿日期：2023-04-14； **修订日期**：2023-08-30
基金项目：NSFC-山西煤基低碳联合基金项目（U1910207）；国家自然科学基金青年基金项目（31700413）；山西省高等学校人文社会科学重点研究基地项目（20210122）；山西省基础研究计划（自由探索类）项目（202203021221224）
作者简介：张建华(1978-)，女，博士，副教授，主要从事植物生态学、生态系统物质循环研究. E-mail: wj123-2007@163.com
通讯作者：徐龙超. E-mail: xulongchao@tyut.edu.cn

坡滑坡及水土流失[22]、重金属污染[23]等方面，然而针对矿区排土场不同植被类型凋落物持水性能的相关报道较少[24]，然而，不同类型人工林不同分解程度凋落物持水特性及其对矿区植被生态修复的影响仍不清晰。本研究以山西安太堡煤矿排土场生态恢复区4种典型人工林为研究对象，对其凋落物的持水能力进行探究，了解不同人工林的水源涵养功能、水土保持功能，为该地区生态修复过程中科学营林和植被恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

平朔安太堡露天煤矿位于山西省宁武煤田的北端（112°10′~113°30′E，39°23′~39°37′N），位于朔州市区与平鲁区交界处，总面积达380 km^2，是目前中国最大的露天煤矿[25]。该地区属于典型的温带半干旱大陆性季风气候，年均降水量为428.2 mm，年平均气温为5.5 ℃，≥10 ℃的年积温为2300~2500 ℃，无霜期为117 d。地带性植被类型为干草原，零星分布，覆盖率低，主要地带性土壤为栗钙土与栗褐土的过渡类型[26]。经过多年的复垦，矿区植被得到了有效恢复，目前已经形成以刺槐（*Robinia pseudoacacia*）、油松（*Pinus tabulaeformis*）、沙棘（*Hippophae rhamnoides*）、榆树（*Ulmus pumila*）、小叶杨（*Populus simonii*）等为主的具有丰富生物多样性的植被恢复区，基本覆盖了排土场原有的裸露地表，其生态环境得到了有效恢复[27]。

1.2 样地设置

2019年8月，在实地调查的基础上，在排土场复垦区的4种林型内各设置3个标准样地（20 m×20 m），调查样地经纬度、海拔和植被特征，具体情况详见表1。

1.3 凋落物采集

在每块样地的上、中、下部随机布设3个面积为1 m × 1 m的样方，分别测量各样方内凋落物总厚度，并按照未分解层和半分解层分别收集凋落物样品。未分解层是由外表无分解痕迹的新鲜凋落物组成，其颜色变化不明显，且质地坚硬，而剩余部分均为半分解层[9]。分别将各层次凋落物装好后带回实验室称重（鲜重）后，在恒温85 ℃下烘干至恒重。不同分解层凋落物蓄积量是通过烘干法测定不同分解层凋落物样品的自然含水量，根据凋落物鲜重和其自然含水量计算样方不同分解层凋落物干重，进而计算单位面积林地上不同分解层凋落物蓄积量[6]，总蓄积量为不同分解层凋落物蓄积量之和。

1.4 凋落物持水性能测定

采用室内浸泡法测定凋落物的持水性能。分别取20 g不同人工林类型、不同分解层次烘干的凋落物样品装入尼龙网袋并封口，然后浸泡在水中，分别在0.5、1、2、4、8、12 h和24 h后捞起并静置，至凋落物不再滴水时迅速称量其湿重，然后在烘箱中85 ℃烘至恒重测定干重，以研究其吸水速度及吸水过程，不同浸水时间凋落物的持水量、凋落物持水率、凋落物吸水速率和凋落物有效拦蓄量[1]按照下列公式计算：

$$\text{凋落物持水量}\left(t\cdot hm^{-2}\right)=\left[\text{凋落物湿重}\left(kg\cdot m^{-2}\right)-\text{凋落物干重}\left(kg\cdot m^{-2}\right)\right]\times 10$$

$$\text{凋落物持水率}(\%)=\frac{\text{凋落物持水量}}{\text{凋落物干质量}}\times 100$$

$$\text{凋落物吸水速率}\left(g\cdot g^{-1}\cdot h^{-1}\right)=\frac{\text{凋落物持水量}\left(g\cdot g^{-1}\right)}{\text{吸水时间}(h)}$$

表1 不同类型人工林概况

Tab. 1 General information of different artificial forests

林型	纬度	经度	海拔/m	人工林类型	林龄/a	林下优势种	平均胸径/cm	平均树高/m	密度/(株·hm^{-2})	郁闭度/%
小叶杨	39°29′26.15″N	112°18′55.30″E	1469	纯林	25	赖草、早熟禾、阿尔泰狗娃花	10.90	5.50	2133	40
榆树	39°29′28.64″N	112°18′44.41″E	1474	纯林	25	兴安胡枝子、早熟禾、阿尔泰狗娃花	12.90	5.50	1100	56
油松	39°29′29.80″N	112°18′46.49″E	1471	纯林	25	兴安胡枝子、早熟禾、阿尔泰狗娃花	10.70	4.70	1500	75
刺槐	39°29′33.35″N	112°18′44.08″E	1474	纯林	25	角蒿、铁杆蒿、早熟禾	9.80	4.80	2033	70

$$\text{凋落物有效拦蓄量}\left(\mathrm{t\cdot hm^{-2}}\right)=\left(0.85\times\text{最大持水率}-\text{平均自然含水率}\right)\times\text{凋落物现存量}\left(\mathrm{t\cdot hm^{-2}}\right)$$

当凋落物含水量达到饱和时的持水量和持水率被认为是该凋落物的最大持水量和持水率。通常将浸泡24 h的持水量和持水率分别称为该凋落物的最大持水量($\mathrm{t\cdot hm^{-2}}$)和最大持水率(%)[1]。

1.5 数据处理

利用Office 2010 Excel对数据进行平均值、标准差等描述性统计分析，利用PASW Statistics 18.0 (IBM) 中的单因素方差分析(One-Way ANOVA)对不同类型人工林凋落物蓄积量及持水指标和相同人工林类型凋落物不同分解层次差异显著性进行检验(LSD法)，并对凋落物持水量等与浸水时间进行非线性回归分析；作图使用Sigmaplot 12.5。

2 结果与分析

2.1 凋落物蓄积量

研究区典型人工林凋落物量总厚度在2.33~3.60 cm之间(表2)，油松林凋落物厚度最大，显著高于小叶杨和榆树林($P<0.05$)；凋落物总蓄积量为1.38~3.53 $\mathrm{t\cdot hm^{-2}}$，以小叶杨林总蓄积量最大，显著高于榆树林($P<0.05$)，油松和刺槐居中。榆树未分解层凋落物蓄积量显著高于半分解层，而油松半分解层凋落物蓄积量显著高于未分解层($P<0.05$)，小叶杨和刺槐半分解和未分解层凋落物蓄积量均无显著差异。未分解层凋落物蓄积量以小叶杨林最大(1.78 $\mathrm{t\cdot hm^{-2}}$)，均显著高于其他3种类型人工林($P<0.05$)；半分解层凋落物蓄积量以油松林最大，为2.07 $\mathrm{t\cdot hm^{-2}}$，显著高于榆树林蓄积量($P<0.05$)，小叶杨和刺槐居中。

2.2 凋落物持水过程

2.2.1 *凋落物持水量*　安太堡煤矿复垦区4种典型人工林凋落物持水量随时间的变化规律基本相同，均为前0.5 h急剧增加，然后随浸水时间而缓慢增加，最后达到稳定状态(图1)。油松和小叶杨林半分解层凋落物的持水量均较高，榆树林最低；在未分解层凋落物持水量以小叶杨最大，显著高于油松林($P<0.05$)，刺槐林和榆树林居中，二者均与小叶杨和油松林无显著差异。在浸泡0.5、4、8、12 h和24 h，榆树未分解层凋落物持水量均显著高于半分解层($P<0.05$)，而其他人工林半分解和未分解层凋落物持水量无显著差异，表明榆树凋落物持水能力与其分解程度存在一定关系。

4种典型人工林类型不同分解程度凋落物的持水量W均随浸泡时间t按照$W=a+b\ln t$对数形式变化(式中a和b均为系数)，拟合方程的R^2均大于0.9，由此可以认为，凋落物持水量与浸泡时间存在较好的相关性(表3)。

2.2.2 *凋落物持水率*　4种人工林凋落物持水率在初始阶段增长较快，前0.5 h持水率增长最快，随后增幅逐渐减小，随着浸水时间的增加逐渐趋于稳定(图2)。不同人工林半分解层凋落物持水率以榆树林最大，其次为刺槐林，在整个浸泡实验过程中，二者均显著高于小叶杨林和油松林凋落物持水率；而未分解层凋落物持水率以刺槐林最大，其次为榆树林，在整个浸水过程中，二者均显著高于油松林凋落物持水率($P<0.05$)，在浸泡4、8、12 h和24 h，小叶杨林未分解层凋落物持水率也显著高于油松林($P<0.05$)。在整个浸泡过程中，榆树林和油松林的半分解层凋落物持水率显著高于未分解层($P<0.05$)，而小叶杨林和刺槐林不同分解程度凋落物持水率无显著性差异，表明榆树和油松凋落物的分解程度可显著影响其持水率。

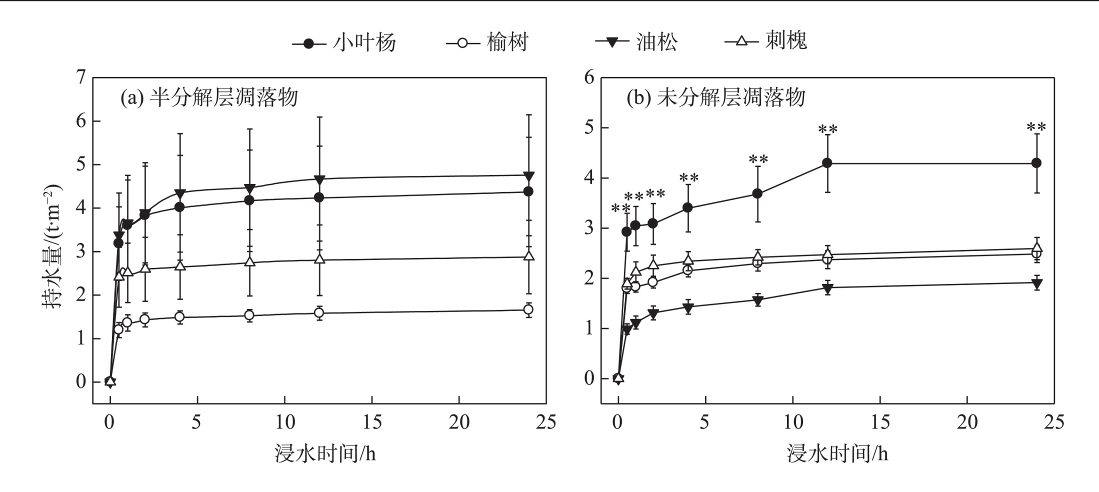
4种典型人工林类型不同分解程度凋落物的持水率R均随浸泡时间t按照$R=a+b\ln t$对数形式变化(式中a和b均为系数)，且回归系数均很高，表明凋落物持水率与浸泡时间存在较好的相关性(表4)。

表2　不同人工林凋落物厚度与蓄积量

Tab. 2　Depth and cumulated mass of litter in different artificial forests

林型	总厚度/cm	总蓄积量/($\mathrm{t\cdot hm^{-2}}$)	未分解层(U)		半分解层(S)	
			蓄积量/($\mathrm{t\cdot hm^{-2}}$)	比例/%	蓄积量/($\mathrm{t\cdot hm^{-2}}$)	比例/%
小叶杨	2.33±0.44b	3.53±0.72a	1.78±0.23a	53.25±8.13ab	1.76±0.58ab	46.75±8.13ab
榆树	2.60±0.31b	1.38±0.02b	0.93±0.03b	67.26±2.79a	0.45±0.05b	32.74±2.79a
油松	3.60±0.06a	3.14±0.81ab	1.07±0.11b	36.53±4.88b	2.07±0.09a	63.47±4.88b
刺槐	2.70±0.15ab	1.73±0.24ab	0.90±0.03b	53.35±5.63ab	0.83±0.21ab	46.65±5.63ab

注：同列数据后不同小写字母表示不同人工林类型间存在显著差异($P<0.05$)。



注:**表示同一浸水时间下不同类型人工林未分解层凋落物持水量在0.01水平上差异显著。

图1 凋落物持水量随浸水时间的变化特征

Fig. 1 Variation characteristics of litter water holding with immersed time

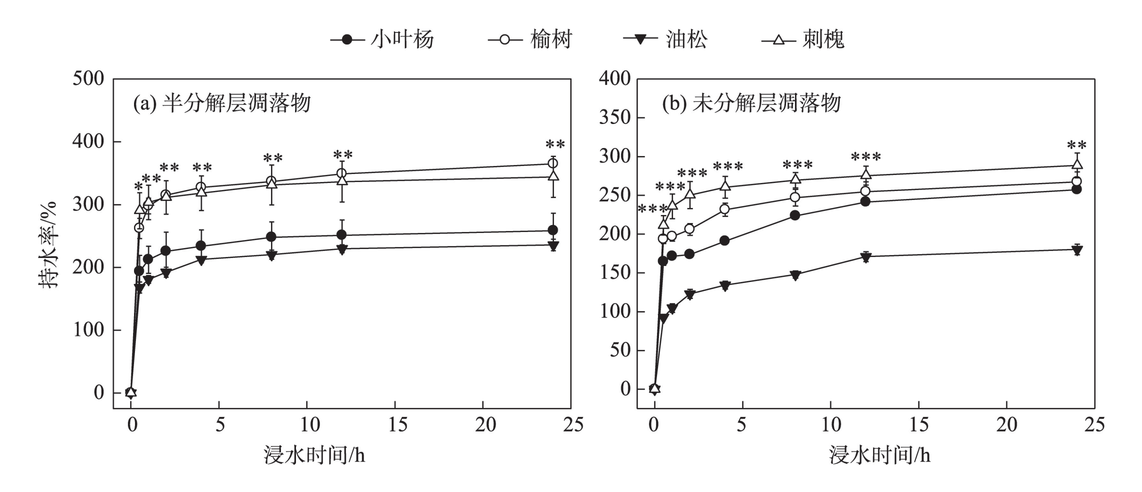
表3 凋落物持水量与浸水时间的关系

Tab. 3 Equations between water holding of litter and the immersion time

人工林类型	凋落物层	方程	R^2
小叶杨	半分解层	W=3.5359+0.2899ln$t$	0.9507**
	未分解层	W=1.3222+0.1070ln$t$	0.9564**
榆树	半分解层	W=3.6787+0.3759ln$t$	0.9739**
	未分解层	W=2.5010+0.1179ln$t$	0.9955**
油松	半分解层	W=3.0141+0.4581ln$t$	0.9229**
	未分解层	W=1.8658+0.1959ln$t$	0.9691**
刺槐	半分解层	W=1.1334+0.2441ln$t$	0.9814**
	未分解层	W=2.0821+0.1668ln$t$	0.9650**

注:**表示在0.01水平上显著相关。下同。

2.2.3 凋落物吸水速率 由图3可知,4种人工林凋落物的吸水速率在0~1 h增加较快,1 h后明显下降,4 h后随浸泡时间的增加降幅逐渐变小,8 h后基本呈现稳定状态,表明此时凋落物吸水达到饱和。不同人工林半分解层凋落物吸水速率以榆树林最大,其次为刺槐林,在整个浸泡实验过程中,二者均显著高于小叶杨林和油松林凋落物吸水速率;而未分解层凋落物吸水速率以刺槐林最大,其次为榆树林,在整个浸泡实验过程中,二者均显著高于油松林凋落物吸水速率(P<0.05),在浸泡4、8、12 h和24 h,小叶杨林未分解层凋落物吸水速率也显著高于油松林(P<0.05)。在整个浸水过程中,榆树林和油松林的半分解层凋落物吸水速率显著高于未分解层(P<0.05)。而小叶杨林和刺槐林均无显著性差异,表明榆树和油松凋落物的分解程度可显著影响其吸水速率。



注:*、**和***分别表示同一浸水时间下不同类型人工林凋落物持水率在0.05、0.01和0.001水平上差异显著。

图2 凋落物持水率随浸水时间的变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of litter water-holding rate with immersed time

表4 凋落物持水率与浸水时间的关系

Tab. 4 Equations between water-holding rate and the immersion time

人工林类型	凋落物层	方程	R^2
小叶杨	半分解层	R=210.21+16.506ln$t$	0.9760**
	未分解层	R=290.25+24.142ln$t$	0.9959**
榆树	半分解层	R=181.71+18.376ln$t$	0.9845**
	未分解层	R=301.38+13.745ln$t$	0.9933**
油松	半分解层	R=169.70+25.719ln$t$	0.9199**
	未分解层	R=200.68+21.030ln$t$	0.9693**
刺槐	半分解层	R=106.10+23.170ln$t$	0.9812**
	未分解层	R=231.85+18.470ln$t$	0.9689**

4种典型人工林类型不同分解程度凋落物的吸水速率V均随浸泡时间t按照$V=kt^{-a}$幂函数形式变化(式中a为系数)，拟合方程的相关系数R^2均大于0.9，表明凋落物吸水速率与浸水时间关系密切(表5)。

2.3 凋落物持水能力

不同人工林类型半分解层、未分解层和总凋落物层最大持水量均以小叶杨林最高(4.57 t·hm^{-2})，显著高于榆树林(P<0.05)；榆树未分解层凋落物最大持水量显著低于其半分解层凋落物(P<0.05)，而其余人工林类型半分解层和未分解层凋落物最大持水量无显著差异(图4)。不同人工林类型总凋落物层最大持水率以榆树和刺槐林最大，显著高于小叶杨林和油松林(P<0.05)，其次小叶杨林显著高于油松林(P<0.05)，榆树和刺槐林半分解层凋落物最大持水率显著高于小叶杨和油松林(P<0.05)，油松未分解层凋落物最大持水率(235.82%)显著低于其他类型人工林；榆树和油松林半分解层最大持水率显著高于未分解层(P<0.05)。

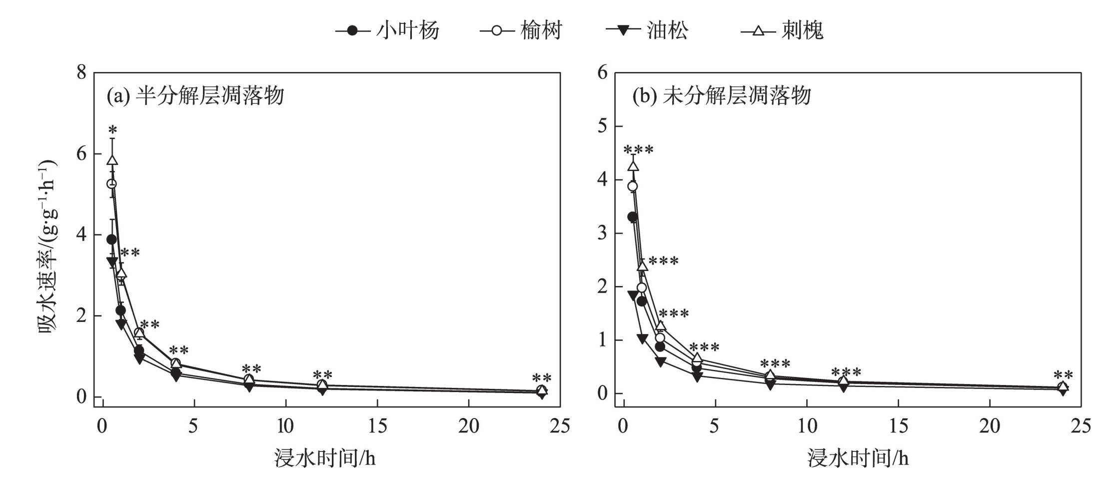
不同人工林类型总凋落物层有效拦蓄量以小叶杨林最高(7.31 t·hm^{-2})，显著高于榆树林(P<0.05)，小叶杨、油松和刺槐林半分解层凋落物有效拦蓄量均显著高于榆树林(P<0.05)，小叶杨林未分解层凋落物有效拦蓄量最高(3.75 t·hm^{-2})，显著高于其他3种人工林(P<0.05)(图5)；榆树未分解层凋落物有效拦蓄量显著低于其半分解层凋落物(P<0.05)，而其余人工林类型半分解层和未分解层凋落物有效拦蓄量显著差异。不同人工林类型总凋落物层有效拦蓄率以榆树和刺槐林最大，显著高于小叶杨林和油松林(P<0.05)，其次小叶杨林显著高于油松林(P<0.05)，榆树和刺槐林半分解层凋落物有效拦蓄率显著高于小叶杨和油松林(P<0.05)，油松未分解层凋落物有效拦蓄率(235.82%)显著低于其他类型人工林；榆树和油松林半分解层有效拦蓄率显著高于未分解层(P<0.05)。

在该地区4种典型人工林类型中，小叶杨林凋落物的最大持水量和有效拦蓄量均最大，油松林次之，表明二者凋落物持水能力较强。

3 讨 论

3.1 凋落物总蓄积量

森林凋落物蓄积量主要取决于凋落物输入量、分解量和积累年限[28-31]。首先，本研究中4种人工林发育年龄相近，凋落物累积年限也基本相同；其次，树种组成对凋落物输入量有显著影响[30]，凋落物量总厚度在2.33~3.60 cm之间，表现为油松林>刺



注：*、**和***分别表示同一浸水时间下不同类型人工林凋落物吸水速率在0.05、0.01和0.001水平上差异显著。

图3 凋落物吸水速率随浸水时间的变化特征

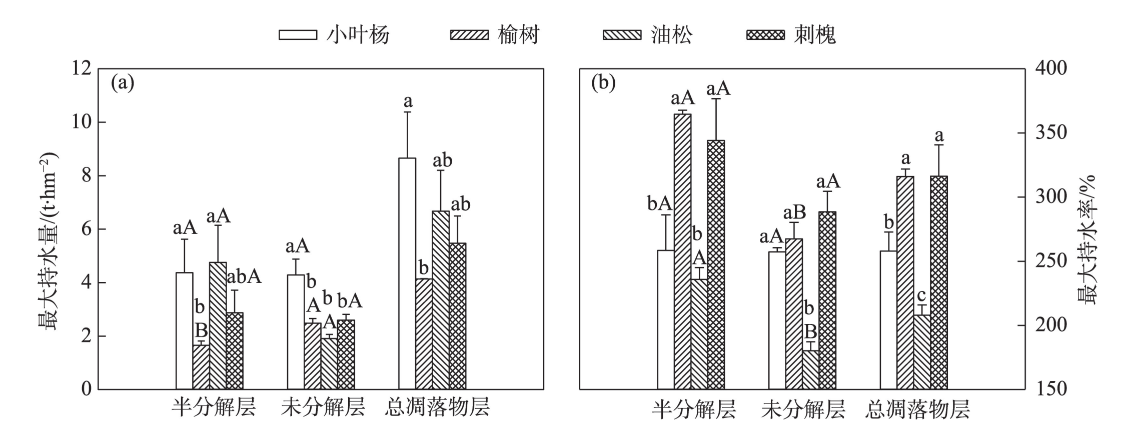
Fig. 3 Variation characteristics of water-absorption rate with immersed time

表5 凋落物吸水速率与浸水时间的关系

Tab. 5 Equations between water-absorption rate and the immersion time

人工林类型	凋落物层	方程	R^2
小叶杨	半分解层	$V=2.0981t^{-0.927}$	0.9998**
	未分解层	$V=1.7015t^{-0.875}$	0.9986**
榆树	半分解层	$V=2.8951t^{-0.923}$	0.9995**
	未分解层	$V=2.0062t^{-0.907}$	0.9997**
油松	半分解层	$V=1.8133t^{-0.909}$	0.9998**
	未分解层	$V=1.058t^{-0825}$	0.9994**
刺槐	半分解层	$V=3.013t^{-0.957}$	0.9999**
	未分解层	$V=2.3135t^{-0.926}$	0.9997**

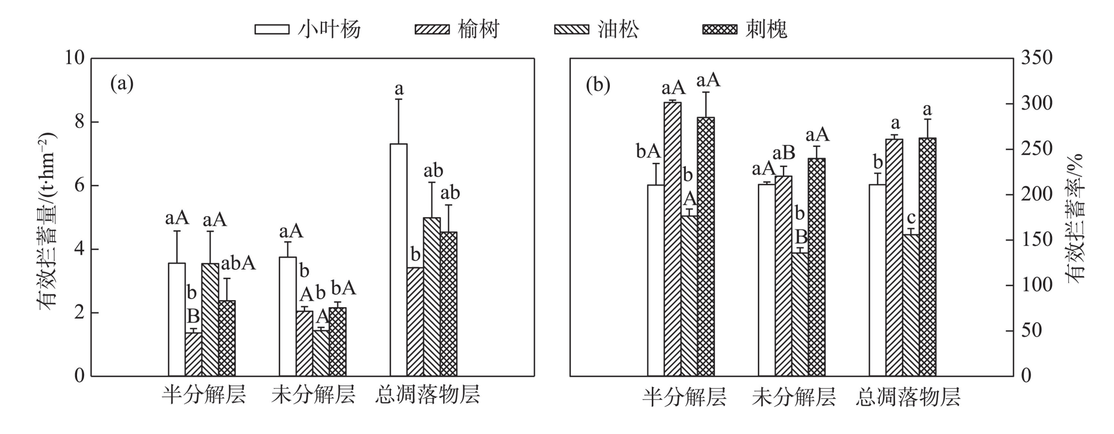
槐林>榆树林>小叶杨林；凋落物蓄积量介于1.38~3.54 t·hm^{-2}之间，表现为小叶杨林>油松林>刺槐林>榆树林，均明显低于华北地区凋落物现存量的平均值(9.32 t·hm^{-2})[32]，亦低于相邻地理区域，如北京百花山区油松、青杨和刺槐林凋落物层蓄积量在15.1~18.5 t·hm^{-2}之间[33]，北京东灵山白桦和辽东栎和油松林凋落物层蓄积量在6.0~24 t·hm^{-2}之间[34]，这不仅与林木类型、林龄及生长特性等有关，更与排土场与北京东灵山和百花山立地条件的差异有关。排土场土壤环境恶劣，如水分和养分亏缺、重金属污染等问题，导致地上植被无法正常生长、地表枯落物较少[24]。凋落物蓄积量排列顺序与凋落物厚度排序不一致，造成这种差异的原因是4种人工林树种不同，凋落物层的成分和空间构成存在差异，造成凋落物厚度与质量无关；最后，地被层中微生物是影响人工林枯落物分解的重要影响因子，其活性与温度、湿度、土壤含水量等环境因子密切相关[8]，因



注：小写字母表示相同凋落物层不同人工林凋落物最大持水量(率)差异显著(P <0.05)；不同大写字母表示相同人工林类型半分解和未分解层凋落物最大持水量(率)差异显著(P <0.05)。

图4 不同人工林凋落物最大持水量(率)

Fig. 4 Maximum water-holding capacity and rate of litter in different artificial forests



注：小写字母表示相同凋落物层不同人工林凋落物有效拦蓄量(率)差异显著(P <0.05)；不同大写字母表示相同人工林类型半分解和未分解层凋落物有效拦蓄量(率)差异显著(P <0.05)。

图5 不同人工林凋落物有效拦蓄量(率)

Fig. 5 Effective retaining capacity and rate of litter in different artificial forests

此,不同立地条件也是影响枯落物分解的重要因子,同时也是造成不同人工林凋落物厚度和重量差异的重要原因[35]。

本研究中除油松林外,3种阔叶林(小叶杨、榆树、刺槐)凋落物未分解层蓄积量比例均高于半分解层,与常雅军等[36]和刘小娥等[29]分别在甘肃小陇山和兰州南北两山对不同林分凋落物的研究结果相反,反映了在相同的气候条件,不同林分凋落物在养分归还方面的一致性[36]。造成上述相反结果的原因可能与研究区的气候和林分类型不同有关。在半干旱地区,水分是影响枯落物分解的主要因素[28,37]。本研究发现,与其他3种人工林相比,油松林长势良好,郁闭度较高,地被层和土壤含水量较高,但发现油松凋落物厚度显著高于其他阔叶林,在同一地区,针叶林凋落物分解率显著低于阔叶林[28],这与不同树叶的叶形等特质有关,且油松林的蓄积量也相对较高。因此,从提升土壤水分及涵养水源的角度,油松是相对适宜在半干旱矿区栽植的人工林树种之一。

3.2 凋落物持水性能

蓄积量、最大持水量、吸水速率、有效拦蓄量等是评估凋落物水源涵养功能的重要指标[38-39],决定着凋落物拦截降水及减少地表径流的能力,其中,凋落物最大持水量和有效拦蓄量是最常用的指标[40]。凋落物持水率及其现存量决定了凋落物持水量的多少[9],4种典型人工林中,油松林凋落物持水率及吸水速率均最低,这可能是油松叶片油脂与水排斥的特性造成的[9],但由于其半分解层蓄积量较大,所以半分解层凋落物的持水量最高(4.76 $t \cdot hm^{-2}$)。同一森林类型,因凋落物分解程度不同,导致其持水量、持水率及吸水速率存在差异[7]。本研究中小叶杨林总凋落物层蓄积量、最大持水量和有效拦蓄量均为最高,说明蓄积量及分解程度对凋落物水源涵养能力的影响较大[9,41]。森林凋落物的持水能力受到其吸水速率的极大影响。较高吸水速率的凋落物具有较快的森林降水涵蓄速度,进而能够减少地表径流[42]。刺槐最大持水率和吸水速率最高,但是由于其蓄积量远低于小叶杨,因此有效拦蓄量也较小。综上所述,在短时间内,刺槐林有助于更快的吸收降雨,而从长远角度来看,小叶杨林拦蓄能力更好。

榆树和油松林凋落物半分解层最大持水率均显著高于未分解层,这与前人研究结果一致[9,43],半分解层持水率较高是因为其结构疏松,吸水能力强[36]。本研究中榆树凋落物最大持水率远高于油松,这可能是由于榆树林凋落物碳氮比(C:N)高于油松林[44],适当较高的C:N能够加快微生物发酵分解[45],进而影响其持水率。4种人工林凋落物持水量和持水率与时间关系均呈显著的对数关系,吸水速率与时间呈显著的幂函数关系,这与赵晓春等[1]、何琴飞等[7]、杜晨曦等[46]研究结果相一致。综上可知,凋落物蓄积量是人工林持水性能的第一决定因素,小叶杨林是当地生态恢复植树造林中应该要优先考虑的造林树种,刺槐也可以适当与其混交栽培,提高短时暴雨情况下的拦蓄能力。

4 结 论

露天煤矿复垦区4种典型人工林中,凋落物蓄积量、最大持水量和有效拦蓄量均以小叶杨林为最高,其次为油松林,表明小叶杨和油松林凋落物的蓄积量和持水能力较强;凋落物吸水速率和最大持水率均以刺槐林最佳,表明刺槐林凋落物有较强吸水和持水能力。因此,在山西省矿区排土场的修复过程中以小叶杨或油松为主栽树种,以刺槐为混交树种,形成小叶杨/油松-刺槐林的混交林格局,是生态恢复过程中提高水源涵养功能及保护生态脆弱区的重要方法。

参考文献(References):

[1] 赵晓春, 刘建军, 任军辉, 等. 贺兰山4种典型森林类型凋落物持水性能研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(2): 107-111. [Zhao Xiaochun, Liu Jianjun, Ren Junhui, et al. Study on water-holding capacity of litter in four forest types of Helan Mountain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(2): 107-111.]

[2] 刘效东, 乔玉娜, 周国逸, 等. 鼎湖山3种不同演替阶段森林凋落物的持水特性[J]. 林业科学, 2013, 49(9): 8-15. [Liu Xiaodong, Qiao Yuna, Zhou Guoyi, et al. Water-holding characteristics of litters in three forests at different successional stages in Dinghushan[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(9): 8-15.]

[3] Walter J, Buchmann C M, Schurr F M. Shifts in plant functional community composition under hydrological stress strongly decelerate litter decomposition[J]. Ecology and Evolution, 2020, 10(12): 5712-5724.

[4] 管惠文, 董希斌, 张甜, 等. 间伐强度对大兴安岭落叶松天然次生林水文性能的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(6): 68-76. [Guan Huiwen, Dong Xibin, Zhang Tian, et al. Effects of thinning on hydrological properties of the natural secondary *Larix gmelinii* forest in the Daxing' an Mountains[J]. Jour-

nal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2018, 42(6): 68-76.]

[5] 邹奕巧, 孙欧文, 刘海英, 等. 浙江省天台县不同森林类型枯落物及土壤水文特性[J]. 水土保持通报, 2020, 40(3): 170-174. [Zou Yiqiao, Sun Ouwen, Liu Haiying, et al. Hydrological characteristics of litters and soils of different forest types in Tiantai County of Zhejiang Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(3): 170-174.]

[6] 张志兰, 郑云泽, 于秀娟. 重庆市几种常见经济林凋落物持水性能研究[J]. 中国水土保持, 2019(2): 59-62. [Zhang Zhilan, Zheng Yunze, Yu Xiujuan. Study on water-holding characteristics of litters in several common economic forests in Chongqing[J]. Soil and Water Conversation in China, 2019(2): 59-62.]

[7] 何琴飞, 郑威, 彭玉华, 等. 珠江流域中游主要森林类型凋落物持水特性[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 128-134. [He Qinfei, Zheng Wei, Peng Yuhua, et al. Water-holding characteristics of litter under main forest types in the middle reaches of Pearl River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(1): 128-134.]

[8] 王士永, 余新晓, 贾国栋, 等. 北京山区主要人工林枯落物水文效应[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(5): 42-47. [Wang Shiyong, Yu Xinxiao, Jia Guodong, et al. Hydrological effects of forest litters of different forests in Beijing mountainous area[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(5): 42-47.]

[9] 孟庆权, 葛露露, 杨馨邈, 等. 滨海沙地不同人工林凋落物现存量及其持水特性[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 146-152. [Meng Qingquan, Ge Lulu, Yang Xinmiao, et al. Water-holding capacity and accumulation amount of litters in different plantations in coastal sandy area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(3): 146-152.]

[10] 张瑛, 徐庆, 高德强, 等.湖南会同不同林分类型杉木人工林凋落物水文效应[J]. 林业科学研究, 2021, 34(6): 81-89. [Zhang Ying, Xu Qing, Gao Deqiang, et al. Hydrological effects of litters in different types of *Cunninghamia lanceolata* plantations in Huitong of Hunan, China[J]. Forest Research, 2021, 34(6): 81-89.]

[11] 牟雪, 姜鹏, 王卫军, 等. 北沟林场两种不同林分林下枯落物现存量及持水能力的研究[J]. 河北林果研究, 2014, 29(1): 1-4. [Mu Xue, Jiang Peng, Wang Weijun, et al. Study on litter contents and water holding capacity of two stand forests on Beigou forest farm[J]. Hebei Journal of Forestry and Orchard Research, 2014, 29(1): 1-4.]

[12] 张绍良, 米家鑫, 侯湖平, 等. 矿山生态恢复研究进展：基于连续三届的世界生态恢复大会报告[J]. 生态学报, 2018, 38(15): 5611-5619. [Zhang Shaoliang, Mi Jiaxin, Hou Huping, et al. Research progress on mining ecological restoration: Based on the report of three consecutive World Ecological Restoration Conferences[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): 5611-5619.]

[13] 谢苗苗, 刘金莹, 陈彬, 等. 生态脆弱区复垦排土场干扰类型划分及影响因素分析[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2): 280-288. [Xie Miaomiao, Liu Jinying, Chen Bin, et al. Classification of disturbance types and influencing factors of reclamation dump in ecological fragile area[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 280-288.]

[14] 魏忠义, 白中科. 露天矿大型排土场水蚀控制的径流分散概念及其分散措施[J]. 煤炭学报, 2003, 28(5): 486-490. [Wei Zhongyi, Bai Zhongke. Concept and measures of runoff-dispersing on water erosion control in the large dump of opencast mine[J]. Journal of the China Coal Society, 2003, 28(5): 486-490.]

[15] 吕凯, 李雪飞, 智颖飙. 天煤矿排土场生物修复与生态重建技术[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2019, 48(5): 458-464. [Lv Kai, Li Xuefei, Zhi Yingbiao. Mechanism of phytoremediation and co-reconstruction for waste dump in open-cast collieries [J]. Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition), 2019, 48(5): 458-464.]

[16] Houerou H L. Restoration and rehabilitation of arid and semiarid Mediterranean ecosystems in North Africa and West Asia: A review[J]. Arid Soil Research and Rehabilitation, 2000, 14(1): 3-14.

[17] 孙泰森, 白中科. 大型露天煤矿废弃地生态重建的理论与方法[J]. 水土保持学报, 2001, 15(5): 56-59. [Sun Taisen, Bai Zhongke. Theories and methods of ecological rehabilitation of abandoned land from large scale opencast coal mine[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2001, 15(5): 56-59.]

[18] 曹梦, 郭孝理, 赵云泽, 等. 复垦年限及植被模式对矿区土壤质量的影响[J]. 中国矿业, 2020, 29(2): 72-76, 93. [Cao Meng, Guo Xiaoli, Zhao Yunze, et al. Effects of regenerated periods and vegetation modes on soil quality in regenerated land of opencast coal mine[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(2): 72-76, 93.]

[19] Yuan Y, Li X, Xiong D, et al. Effects of restoration age on water conservation function and soil fertility quality of restored woodlands in phosphate mined-out areas[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(23): 1-14.

[20] 吕刚, 李涵哲, 董亮, 等. 暴雨作用下黑岱沟露天煤矿排土场土壤侵蚀泥沙来源解译[J]. 煤炭学报, 2022, 47(S1): 225-234. [Lv Gang, Li Hanzhe, Dong Liang, et al. Characteristics and source analysis of erosion sediment in dump of open pit coal mine based on REE tracing[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(S1): 225-234.]

[21] 李刚. 排土场土壤侵蚀研究进展[J]. 山西水土保持科技, 2021(3): 3-6. [Li Gang. Research progress of soil erosion in dumps[J]. Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi, 2021(3): 3-6.]

[22] 唐骏, 党廷辉, 薛江, 等. 植被恢复对黄土区煤矿排土场土壤团聚体特征的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 5067-5077. [Tang Jun, Dang Tinghui, Xue Jiang, et al. Effects of vegetation restoration on soil aggregate characteristics of an opencast coal mine dump in the loess area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(16): 5067-5077.]

[23] 罗炳圣, 林龙勇, 邓一荣, 等. 干旱区排土场重金属污染评价及生态损害估算研究——以某煤矿排土场为例[J]. 环境科学与管理, 2022, 47(1): 174–179. [Luo Bingsheng, Lin Longyong, Deng Yirong, et al. Assessment of heavy metal pollution and estimation of ecological damage in waste dump in arid area——a case study of a coal mine waste dump in Xinjiang[J]. Environmental Science and Management, 2022, 47(1): 174–179.]

[24] 李叶鑫, 吕刚, 刁立夫, 等. 露天煤矿排土场不同植被类型持水能力评价[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 309–320. [Li Yexin, Lv Gang, Diao Lifu, et al. Evaluation of water retention capacity of different vegetation types in dump of open cast coal mine[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2017, 31(5): 309–320.]

[25] 郭春燕, 李晋川, 岳建英, 等. 安太堡露天煤矿复垦区不同人工林土壤呼吸特征[J]. 水土保持通报, 2015, 35(3): 55–61. [Guo Chunyan, Li Jinchuan, Yue Jianying, et al. Soil respiration characteristics of different artificial forests in reclaimed region of Antaibao Opencast Coal Mine[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(3): 55–61.]

[26] 张青, 毕润成, 吴兆飞, 等. 安太堡露天煤矿植被恢复区物种天然更新时空动态[J]. 生态学杂志, 2016, 35(12): 3223–3232. [Zhang Qing, Bi Runcheng, Wu Zhaofei, et al. Temporal-spatial dynamics of natural regeneration of species in ecological reclamation of Antaibao Opencast Coal Mine[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(12): 3223–3232.]

[27] 李晋川, 白中科, 柴书杰, 等. 平朔露天煤矿土地复垦与生态重建技术研究[J]. 科技导报, 2009(17):30–34. [Li Jinchuan, Bai Zhongke, Chai Shujie, et al. Study on technology of land reclamation and ecological rehabilitation of waste land in Pingshuo surface mine[J]. Science & Technology Review, 2009(17): 30–34.]

[28] 蒲嘉霖, 刘亮. 亚热带森林凋落物分解特征及水文效应[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6): 165–170. [Pu Jialin, Liu Liang. Hydrology functions and decomposition characteristics of litter in subtropical forest[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26 (6): 165–170.]

[29] 刘小娥, 苏世平. 兰州市南北两山5种典型人工林凋落物的水文功能[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2574–2582. [Liu Xiao'e, Su Shiping. Hydrological functions of litters under five typical plantations in southern and northern mountains of Lanzhou City, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31 (8): 2574–2582.]

[30] 张培, 庞圣江, 杨保国, 等. 不同混交模式对桉树林分生长、凋落物量和土壤养分的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2021, 49(2): 31– 37. [Zhang Pei, Pang Shengjiang, Yang Baoguo, et al. Effects of different mixing patterns on growth, litter production and soil nutrients in *Eucalyptus* plantations[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2021, 49 (2): 31–37.]

[31] 陆卫勇, 叶家义, 李学团, 等. 马尾松、红锥纯林及其混交林凋落物与土壤的水源涵养能力[J]. 亚热带农业研究, 2023, 19(2): 83–90. [Lu Weiyong, Ye Jiayi, Li Xuetuan, et al. Water conservation capacity of litter and soil of pure and mixed-forest of *Pinus massoniana* and *Castanopsis hystrix*[J]. Subtropical Agriculture Research, 2023, 19(2): 83–90.]

[32] 温丁, 何念鹏. 中国森林和草地凋落物现存量的空间分布格局及其控制因素[J]. 生态学报, 2016, 36(10): 2876–2884. [Wen Ding, He Nianpeng. Spatial patterns of litter density and their controlling factors in forests and grasslands of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(10): 2876–2884.]

[33] 刘尚华, 冯朝阳, 吕世海, 等. 京西百花山区6种植物群落凋落物持水性能研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 179–182. [Liu Shanghua, Feng Chaoyang, Lv Shihai, et al. Study on water-holding capacity of litter in six vegetation communities in Baihua mountainous areas of West Beijing[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2007, 21(6): 179–182.]

[34] 方精云, 刘国华, 朱彪, 等. 北京东灵山三种温带森林生态系统的碳循环[J]. 中国科学: D辑, 2006, 36(6): 533– 543. [Fang Jingyun, Liu Guohua, Zhu Biao, et al. Carbon cycling of three types of temperate forest in Beijing Dongling Mountains[J]. Science in China Ser D Earth Science, 2006, 36(6): 533–543.]

[35] 陈方清. 不同覆盖材料对油茶果实及产量的影响[J]. 河北林业科技, 2016(5): 28–31. [Chen Fangqing. Effect of different cover materials on fruit and fruit yield of *Camellia oleifera* Abel.[J]. The Journal of Hebei Forestry Science and Technology, 2016(5): 28–31.]

[36] 常雅军, 曹靖, 马建伟, 等. 秦岭西部山地针叶林凋落物持水特性[J]. 应用生态学报, 2008, 19(11): 2346–2351. [Chang Yajun, Cao Jing, Ma Jianwei, et al. Water-holding characteristics of coniferous forest litters in west Qinling Mountains[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(11): 2346–2351.]

[37] Couteaux M M, Bottner B, Berg B. Litter decomposition, climate and litter quality[J]. Trends in Ecology and Evolution, 1995, 10(2): 63–66.

[38] 陈进, 徐明, 邹晓, 等. 贵阳市不同林龄马尾松林凋落物储量及持水特性[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6): 146–151. [Chen Jin, Xu Ming, Zou Xiao, et al. Litter layer reserve and water holding capacity of *Pinus massoniana* in different successional stages in Guiyang[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(6): 146–151.]

[39] 郭婧, 喻林华, 方晰, 等. 中亚热带4种森林凋落物量、组成、动态及其周转期[J]. 生态学报, 2015. 35(14): 4668–4677. [Guo Jing, Yu Linhua, Fang Xi, et al. Litter production and turnover in four types of subtropical forests in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4668–4677.]

[40] 李文影, 满秀玲, 张阳武. 不同林龄白桦次生林土壤特性及其水源涵养功能[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(5): 63–69. [Li Wenying, Man Xiuling, Zhang Yangwu. Soil properties and water conservation function of *Betula platyphylla* secondary forest with different stand ages[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(5): 63–69.]

[41] 刘琳, 熊东红, 张宝军, 等. 拉萨河谷杨树人工林枯落物蓄积特征及持水性能[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1674−1682. [Liu Lin, Xiong Donghong, Zhang Baojun, et al. Litter storage and its water-holding capacity of *Populus* plantations in Lhasa River Valley[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1674−1682.]

[42] 赵鸿杰, 谭家得, 张学平, 等. 南亚热带3种人工松林的凋落物水文效应研究[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(5): 54−57, 139. [Zhao Hongjie, Tan Jiade, Zhang Xueping, et al. Hydrological effect on 3 pine plantations in south subtropical China[J]. Journal of Northwest of Forest University, 2009, 24(5): 54−57, 139.]

[43] 张建利, 王加国, 李苇洁, 等. 贵州百里杜鹃自然保护区杜鹃林枯落物储量及持水功能[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 167−173. [Zhang Jianli, Wang Jiaguo, Li Weijie, et al. Litter reserves and water holding characteristics of *Rhododendron* forest in Baili Rhododendron Nature Reserve of Guizhou[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(3): 167−173.]

[44] 王凯, 齐悦彤, 刘建华, 等. 油松与榆树人工林植物-凋落叶-土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2022, 41(3): 427−434. [Wang Kai, Qi Yuetong, Liu Jianhua, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics of plants, leaf litter and soils in *Pinus tabuliformis* and *Ulmus pumila* plantations[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(3): 427−434.]

[45] 何应会, 曾佩玲, 韦铄星, 等. 珍贵树种多树种混交林的凋落物现存量及持水性能[J]. 南方农业学报, 2015, 46(1): 85−90. [He Yinghui, Zeng Peiling, Wei Shuoxing, et al. Litter standing crop and its water-holding capacity of the mixed forest of rare tree multi-species[J]. Journal of Southern Agriculture, 2015, 46(1): 85−90.]

[46] 杜晨曦, 史常青, 杨建英, 等. 小五台山典型林分枯落物持水恢复能力研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 236−243. [Du Chenxi, Shi Changqing, Yang Jianying, et al. Recovery characteristics of water-holding capacity of litter in typical stands of Xiaowutai Mountain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3): 236−243.]

Study on water-holding capacity of litters from typical artificial forests in reclaimed regions of the opencast coal mine in Shanxi Province

ZHANG Jianhua[1], ZHANG Kun[1], LIU Yong[2], ZHANG Hong[2], ZHANG Kaiquan[1], ZHOU Xiaoyang[3], XU Longchao[3]

(1. Department of Biology, Xinzhou Normal University, Xinzhou 034000, Shanxi, China; 2. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China; 3. College of Ecology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;)

Abstract: To study the important effects of the water-holding capacity of litter in plantation plants in coal mine dumps on soil and water conservation and ecosystem restoration in mining areas, litter accumulation amount, the thickness, water-holding rate, water-holding capacity, and water absorption rate of different decomposition stages were investigated in four typical plantations of the same age (*Populus simonii, Ulmus pumila, Pinus tabulaeformis,* and *Robinia pseudoacacia* forests) in the Antaibao opencast coal mine reclamation area, through field investigation and soaking extraction. The results showed that the litter accumulation amount in the *P. simonii* forest was higher than that in the *R. pseudoacacia* and *U. pumila* forests ($P < 0.05$). The water-holding capacity and litter rate at different decomposition degrees changed logarithmically with immersion time ($P < 0.01$). The order of the water absorption rate of litter was *R. pseudoacacia* forest > *U. pumila* forest > *P. simonii* forest > *P. tabulaeformis* forest, and the water absorption rate showed a significant power function with immersion time ($P < 0.01$). In conclusion, the litter of the *P. simonii* forest had the strongest water-holding capacity, whereas the *R. pseudoacacia* forest had the fastest water absorption rate. Therefore, from the perspective of the water conservation capacity of litter, *P. simonii* forest should be prioritized and mixed with the *R. pseudoacacia* forest, which is more conducive to water conservation in the reclamation area of opencast coal mines.

Keywords: reclamation area; plantation; litters; water-holding capacity; Shanxi Province